



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

第
4
版

机械设计

李建功○主编

JIXIE SHEJI



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



本书是在 1999 年第 3 版的基础上修订而成的。修订中以着力提高学生的机械设计能力为出发点, 依据原国家教委高教司批准的“机械设计课程教学基本要求”(1995 年修订版), 对全书内容作了较大幅度的调整和改编。

全书共十五章, 分为五部分: 第一、二、三章为机械设计的基础知识; 第四、五、六章为机械中常用的联接; 第七、八、九、十章为常用的机械传动; 第十一、十二、十三、十四章为轴系零、部件; 第十五章为弹簧。

本书系高等工科院校机械类各专业“机械设计”课程的教材, 适合课内学时为 60~70 学时。此外, 本书也可供其他有关专业的师生及工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

机械设计/李建功主编. —4 版. —北京: 机械工业出版社, 2007. 5
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN 978-7-111-06755-9

I. 机… II. 李… III. 机械设计-高等学校-教材 IV. TH122

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 072623 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
策划编辑: 赵爱宁 责任编辑: 冯 铨 版式设计: 张世琴
责任校对: 刘志文 封面设计: 王伟光 责任印制: 洪汉军
北京京丰印刷厂印刷
2007 年 8 月第 4 版 · 第 1 次印刷
184mm×260mm · 22.5 印张 · 557 千字
标准书号: ISBN 978-7-111-06755-9
定价: 33.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换
销售服务热线电话: (010) 68326294
购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643
编辑热线电话: (010) 88379712
封面无防伪标均为盗版

第 4 版 前 言

本书是在 1999 年第 3 版的基础上,按照普通高等教育“十一五”国家级规划教材的要求修订而成。

本次修订秉承了第 3 版的特色,同时,在符合原国家教委高教司批准的“机械设计课程教学基本要求”(1995 年修订版)的前提下,对教材内容进行了精简和调整,本着以机械零件的设计为主线的基本思路,尽量突出零件的设计方法和相关的基本理论,并力求叙述简明准确,通俗易懂。

具体的修订工作主要有以下几个方面:

1. 整体上对“机械设计总论”和“齿轮传动”这两章进行了重编,使这两章内容的层次更加分明。
2. 考虑到机械设计课程学时大幅缩减的实际情况,删去了第 3 版中的“机械结构设计”一章。
3. 将第 3 版第七章中有关过盈联接的内容缩编为本书第六章中的一节,并增加了“铆接、焊接、粘接简介”一节。
4. 为了便于教学,各章均增加了思考题,并在涉及到相关计算的各章增加了习题。
5. 为了尽量与多数同类教材及先修课程的教材保持一致,对有关的概念和符号进行了修正。
6. 对部分插图进行了调整、修改和更换,以使其更加协调和清晰。

参加本书修订工作的有李建功(第一、二、四、六章),程秀芳(第三、十三章),王春雨(第五、十二章),彭伟(第七、十章),李静(第八章),蔡玉强(第九、十五章),冯立艳(第十一、十四章)。由李建功任主编,程秀芳、彭伟任副主编。

全书由河北理工大学黄永强教授、北京交通大学李德才教授任主审。他们对本书的修订提出了许多宝贵意见,在此表示衷心的感谢。

由于水平所限,书中难免存在错误和不妥之处,殷切希望广大读者批评指正。意见请寄河北理工大学机械工程学院。

编 者

第 3 版 前 言

本书是根据原国家教委高教司批准的“机械设计课程教学基本要求”（机械类专业适用，1995 年修订版）的基本精神，在 1996 年第 2 版的基础上修订而成的。

在第 3 版的编写中，本着打好基础、利于教学的精神和删繁就简、少而精的原则，突出本门课程所必需的基本理论、基本知识和基本技能，精选编写内容，以符合当前教学改革的要求。

这次修订，主要在下列几个方面作了较大的变动：

1. 根据各校的实际教学情况及进一步缩短教学学时的教改要求，修订时删除了第 2 版中的“铆、焊、粘接”一章及“摩擦轮传动”一章。但为了扩大学生的知识面，上述删除内容均在“联接综述”和“传动综述”中作了简介。

2. 加强了结构设计知识的介绍，增加了“机械结构设计”一章。

3. 考虑到近几年标准和设计方法的变化或为了方便教学，修改了一些设计公式、图表和数据。

4. 对原书文字、插图等也作了部分修改。

参加本书修订工作的有：董刚（第一、十二章），李建功（第二、五、六章）、陈冠国（第三、十四章），潘凤章（第四、九章），刘国强（第七、十六章），项忠霞、郑启鸿（第八、十三章），程福安、董刚（第十、十五章），程福安（第十一章）。由董刚、李建功、潘凤章担任主编。

本版由卜炎教授主审，他对本书提出了许多宝贵意见，在此深致谢意。

河北理工学院的陆玉老师、李国柱老师以及天津大学的沈兆光工程师、林孟霞工程师在本书出版过程中均做了大量工作，在此一并致谢。

欢迎广大读者对书中错误和不妥之处给予批评指正。

编 者

1998 年 7 月

第 2 版 前 言

根据两年来各校试用本书第 1 版的实践经验,及师生们提出的问题和不妥之处,对第 1 版在内容上作了修改,并考虑到高等工程教育改革和发展的需要,凡涉及国家标准的内容,均进行了更新(采用 1994 年底前所颁布的标准),使之更好地满足教学需要。

参加本书修订工作的有:唐蓉城(第一、七章),李建功、董刚(第二、十四章),陈冠国(第三、十六章),郑启鸿、王凤礼(第四、十五章),陆玉(第五、六、八章),杨景蕙、佟延伟(第九、十、十八章),潘凤章、唐蓉城(第十一章),程福安(第十二、十三、十七章)。

河北理工学院李国柱老师在本书出版印刷过程中做了大量工作,在此表示衷心感谢。

欢迎各位老师和广大读者对书中错误和不妥之处给予批评指正。

编 者

1995 年 12 月

第 1 版 前 言

本书是天津大学和河北省机械设计教学研究会合编的机械设计系列教材之一。本系列教材有机械设计（机械类）、机械设计基础（近机类）、机械设计基础（非机类）、机械设计课程设计、机械设计习题集（与机械设计配套使用）五种。该系列教材是天津大学和河北省十余所高等学校多年来的教学经验总结。

本书符合 1987 年国家教委批准的教学基本要求。在编写过程中，注意在传统模式上作一定的改进。本书在一些主要章节上增加了设计计算流程图，这有利于学生综合所学内容，同时也为开展计算机辅助教学打下基础。为了便于教与学，书中插图作了适当的更新。改变了传统的“概述”的写法，突出各零件的设计计算和结构设计，为拓宽学生的知识面，适当增加了一些内容。对某些与先修课程有直接关联的内容，编写时不再重述，这样可促使学生温故知新，以达到学习的连贯性。凡涉及国家标准的内容，一律采用 1991 年底所颁布的标准。

参加本书编写的有唐蓉城（第一、七章和传动综述），常觉民（第二、十四章），王凤礼（第三、十七章），佟延伟（第四、九章），陆玉（第五、六、八章），杨景蕙（第十章），潘凤章、唐蓉城（第十一章），程福安（第十二、十三、十八章），陈冠国（第十五、十六章）。

全书由唐蓉城、陆玉主编，天津大学郭芝俊教授、河北工学院董阳照教授主审。唐山工程技术学院李国柱老师在本书出版印刷过程中做了大量工作，在此表示衷心感谢。

由于编者水平所限，书中错误和不当之处希望广大读者给予指正。

编 者

1992 年 8 月

目 录

第 4 版前言	
第 3 版前言	
第 2 版前言	
第 1 版前言	
第一章 机械设计总论	1
第一节 机械设计概述	1
第二节 机械设计课程简介	4
第三节 机械零件的计算准则	5
第四节 机械零件的标准化、系列化和通用化	10
第五节 机械零件常用材料和选择原则	11
思考题	13
第二章 机械零件的疲劳强度设计	14
第一节 概述	14
第二节 疲劳曲线和极限应力图	15
第三节 影响零件疲劳强度的主要因素	20
第四节 受稳定循环应力时零件的疲劳强度	26
第五节 受规律性不稳定循环应力时零件的疲劳强度	33
第六节 低周循环疲劳寿命计算	36
第七节 疲劳裂纹扩展寿命计算	37
思考题	38
习题	38
第三章 摩擦、磨损和润滑基础	40
第一节 摩擦	40
第二节 磨损	44
第三节 润滑剂与添加剂	47
第四节 流体动力润滑的基本原理	54
第五节 弹性流体动力润滑简介	58
思考题	59
联接综述	60
第四章 螺纹联接及螺旋传动	62
第一节 螺纹	62
第二节 螺纹联接的类型、拧紧和防松	63
第三节 单个螺栓联接的强度计算	68
第四节 螺栓组联接的受力分析	77
第五节 提高螺栓联接强度的措施	82
第六节 螺旋传动	86
思考题	94
习题	94
第五章 键、花键、销和形面联接	97
第一节 键联接	97
第二节 花键联接	102
第三节 销联接	105
第四节 形面联接	107
思考题	108
习题	108
第六章 过盈联接、弹性环联接及铆、焊、粘接	110
第一节 过盈联接	110
第二节 弹性环联接	117
第三节 铆接、焊接、粘接简介	117
思考题	122
习题	122
传动综述	124
第七章 带传动	126
第一节 概述	126
第二节 普通 V 带和 V 带轮	127
第三节 带传动的工作情况分析	131
第四节 普通 V 带传动的设计	136
第五节 带传动的张紧装置及使用维护	143
第六节 其他带传动简介	145
思考题	147
习题	147
第八章 齿轮传动	148
第一节 概述	148
第二节 齿轮传动的失效形式和设计准则	148
第三节 齿轮的常用材料	151
第四节 圆柱齿轮传动的受力分析和计算载荷	154

第五节 直齿圆柱齿轮传动的强度计算	160	第一节 滚动轴承的构造与类型	267
第六节 齿轮的许用应力	168	第二节 滚动轴承的代号	270
第七节 斜齿圆柱齿轮传动的强度计算	175	第三节 滚动轴承的载荷分布、失效形式和计算准则	273
第八节 直齿锥齿轮传动	183	第四节 滚动轴承的寿命计算	274
第九节 齿轮传动的润滑与效率	188	第五节 滚动轴承的静强度计算	280
第十节 齿轮的结构	190	第六节 滚动轴承的极限转速	282
思考题	193	第七节 滚动轴承的组合设计	286
习题	194	第八节 滚动轴承的润滑与密封	291
第九章 蜗杆传动	195	思考题	294
第一节 概述	195	习题	295
第二节 蜗杆传动的主要参数与几何尺寸	197	第十三章 滑动轴承	297
第三节 蜗杆传动的失效形式、材料和结构	202	第一节 概述	297
第四节 蜗杆传动的受力分析、效率和润滑	203	第二节 滑动轴承的结构	297
第五节 蜗杆传动的承载能力计算	207	第三节 滑动轴承的失效形式及材料	302
第六节 圆弧圆柱蜗杆传动简介	214	第四节 滑动轴承的润滑	305
思考题	215	第五节 滑动轴承的条件性计算	309
习题	215	第六节 液体动力润滑径向轴承的计算	310
第十章 链传动	217	第七节 其他滑动轴承简介	318
第一节 概述	217	思考题	321
第二节 滚子链和链轮	218	习题	321
第三节 链传动的运动特性与受力分析	221	第十四章 联轴器、离合器和制动器	323
第四节 滚子链传动的设计	225	第一节 联轴器	323
第五节 链传动的正确使用和维护	232	第二节 离合器	329
第六节 齿形链传动简介	234	第三节 制动器	332
思考题	236	思考题	334
习题	236	习题	334
第十一章 轴	238	第十五章 弹簧	335
第一节 概述	238	第一节 概述	335
第二节 轴的结构设计	241	第二节 圆柱螺旋弹簧的结构、材料、许用应力及制造	337
第三节 轴的强度计算	247	第三节 圆柱螺旋弹簧的设计计算	341
第四节 轴的刚度计算	258	第四节 受变载荷螺旋弹簧的强度计算	347
第五节 轴的振动与临界转速	262	思考题	349
思考题	265	习题	350
习题	265	参考文献	351
第十二章 滚动轴承	267		

第一章 机械设计总论

第一节 机械设计概述

物质生产是人类社会生存发展的基础。机械工业肩负着为人类的物质生产提供各种技术装备的重任。机械工业的生产水平是一个国家现代化建设的重要标志。通过大量设计制造和广泛使用各种各样的先进机器，必将大大促进国民经济的发展，加速我国的社会主义现代化建设。随着生产的发展、社会的进步，不断要求开发制造新机器，并对原有机械产品进行更新换代。这都首先是从机械设计工作开始的。

设计是生产产品的第一道工序，是产品具有良好性能的首要保证。要想生产出好的产品，首先要有好的设计。如果设计水平不高，即使有很强的加工制造能力，也不可能生产出性能良好的机械产品。可见，机械设计是一项不可缺少的重要技术工作，在机械工程中占有十分重要的地位。

一、机器的组成

机器的发展经历了一个由简单到复杂的过程。一部现代化的机器中，除了机械系统以外，还常包含电气、润滑、冷却、信号、检测等系统。概括起来，按功能的不同，一部完整的机器主要由五部分组成，见图 1-1。

原动机是驱动整部机器完成预定功能的动力源。一部机器通常只有一个原动机，有些复杂的机器也可能有两个或两个以上的原动机。目前，各种机器中广泛使用的原动机主要有各种形式的电动机和内燃机。工作中它们输出的是回转运动和一定的转矩。此外，还有能够输出直线运动和一定推力（或拉力）的直线马达和作动筒等。

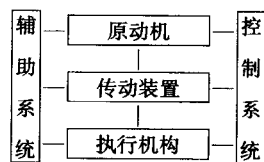


图 1-1 机器的组成

执行机构（也称工作机构）是机器中用于完成具体工作任务的部分。一部机器中可以只有一个执行机构，例如轧钢机的轧辊；也可以有几个执行机构，例如桥式起重机就有卷筒及吊钩、小车行走、大车行走等几个执行机构。不同类型机器的功能不同，执行机构的运动形式不尽相同，可能是直线运动，也可能是回转运动或其他形式的复杂运动。

传动装置是机器中在原动机和执行机构之间转换并传递运动的装置。实际中的机器是多种多样的，其执行机构的运动形式、运动和动力参数也多种多样。而原动机的运动形式、运动和动力参数则是有限的。当两者不同时，需要传动装置将原动机的运动转换成执行机构所需要的运动，并传递给执行机构。常用的传动形式有机械传动、液压传动、气动和电动等。其中，机械传动应用最广。

简单的机器通常只有上述三个组成部分。对于能够实现复杂功能的先进机器，除了以上三个部分以外，还会有控制系统和由润滑、照明装置等组成的辅助系统。

从制造的角度来讲，每部机器都由若干个零件组成，也都是以各个零件为基本单元加工

制造的。所以说，零件是机器的制造单元。机械零件分为两大类：一类是在各种类型的机器中经常用到的零件，称为通用零件，如齿轮、带轮、轴、轴承、螺栓等；另一类是只在某种特定类型的机器中才用到的零件，称为专用零件，如内燃机中的曲轴及活塞、汽轮机中的叶片、飞机的螺旋桨等。此外，把为完成同一使命彼此协同工作的一组零件所构成的组合体称为部件，如滚动轴承、联轴器、减速器等。

在本课程中，机械零件这一术语常用来泛指零件和部件。

二、机械设计的方法和基本程序

机械设计的方法大体上分为以下三种：

1) 内插式设计。内插式设计是指在现有的两个具有大小不等设计参数的设计方案之间所作的设计。这种设计可以借鉴成功的设计经验，认真做一些技术改进工作，通过少量试验研究就能有把握地设计出成功的产品。在设计一般机器时最常采用此方法。

2) 外推式设计。外推式设计是指全部或部分设计参数超出现有设计范围时所作的设计。这种设计虽然有部分经验可以借鉴，但其外推部分处于未知领域，有可能出现意想不到的后果。因此，对外推部分的设计要进行必要的技术研究、理论探索和科学实验。

3) 开发性设计。开发性设计是指为了开发具有新功能的新机器，应用新原理、新技术所作的设计。

机械设计是一项复杂、细致的工作。要想提供功能好、质量高、成本低、竞争力强、市场广的新机器，设计时不仅要考虑机器的功能，还要考虑机器的制造与装配、生产成本、生产周期、维修以及用后回收等产品生命周期全过程的各个方面。

一部新机器，从提出设计任务到形成定型产品，通常需要经过以下几个阶段（图 1-2）：

1) 明确设计任务。根据实际需要确定机器应具有的功能范围和指标，在工作环境、经济性以及寿命等各方面，提出全面的设计要求和设计条件，并形成设计任务书。同时对提出的设计任务进行可行性分析。

2) 方案设计。首先进行机器功能分析，分析清楚应该实现哪些主要功能，多项功能之间有无矛盾，相互之间能否代替等。之后，进行设计方案分析，根据所预期的功能，确定机器的工作原理及技术要求。通常应提出各种不同的设计方案，并对每种方案在经济、技术方

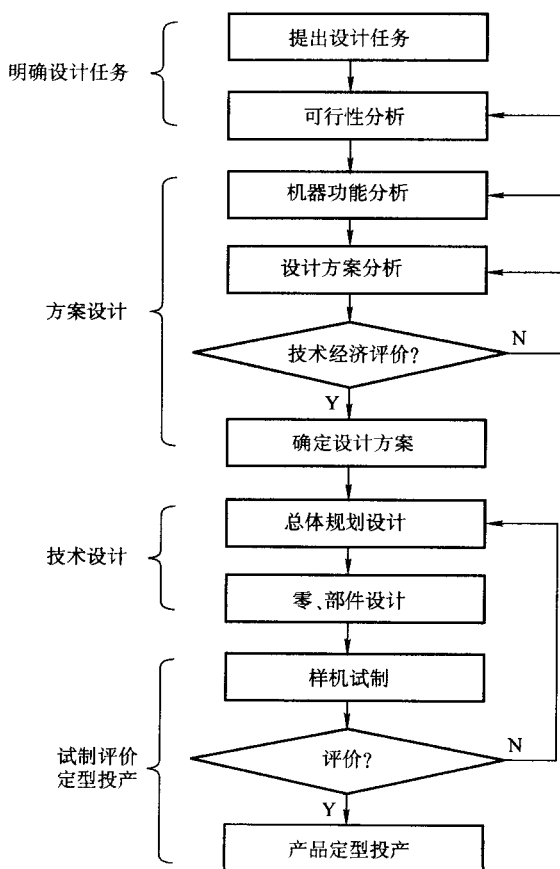


图 1-2 机械设计的基本程序

面进行评价,选出其中最好的作为最终的设计方案。

本阶段是决定整个设计成败与否的关键。在这一阶段,设计工作中的创新性体现得最为充分。

3) 技术设计。通过总体规划设计,确定机器的各主要组成部分以及各部分的总体布置方案,产生机器的总装配图。之后,进行零、部件设计,产生各主要部件的装配图和零件的工作图。同时,对关键零件进行必要的计算,形成计算说明书。

4) 试制评价,定型投产。按技术设计产生的图样试制出样机并进行试验后,根据试验结果对样机进行全面的评价,以决定设计方案是否可用或是否需要修改。必要时修改设计(甚至重新设计)后,重新进行试验,直至达到预期目标为止。对于各方面指标都达到预期的设计,即可形成定型产品进行正式生产。

设计工作是一个综合的反复实践过程,往往需要经过多次修改设计方案和设计参数后,才能获得比较好的设计结果。这个过程实际上是一个宏观的逐步优化过程。

三、机械设计的基本要求

机械设计一般应满足以下几方面的要求:

1) 功能要求。机械产品必须具有设计任务书中规定的功能。这就要求设计时必须正确确定机器的工作原理,并选用适当的执行机构、传动装置和原动机。必要时,还需要合理配置控制系统和辅助系统。

2) 可靠性要求。在预期的使用期限内,能够安全可靠地工作,是对机械产品的基本要求之一。为满足此项要求,在设计阶段往往需要进行强度、刚度、寿命方面的计算。

3) 经济性要求。机械产品的经济性体现在设计、制造和使用的全过程中。设计制造的经济性主要表现为低成本,使用中的经济性主要表现为生产效率高,能源、材料消耗少以及管理、维护费用低等方面。

4) 社会性要求。主要是指机械产品不应对人、环境和社会造成不良影响。例如操作要舒适,要保证操作者的安全,要符合国家在环境保护方面的法规要求等。

以上是各种机械都必须满足的基本要求。对于不同的机械,可能还有一些其他方面的要求。

四、设计者应具备的基本素质

机械设计者是完成机械产品设计任务的关键,只有紧跟科学技术发展的步伐,才能适时地设计出满足时代要求的机械产品。设计者的能力是由各种知识、经验以及个人品质综合而成的。培养一个合格的设计人员,总要经历一个长期的实践过程。总的来讲,对机械设计者主要有以下几方面的要求:

1) 掌握并能够在设计中合理应用设计机械所需的各种知识。作为一个机械设计师,必须掌握与整个产品开发过程相关的各方面的知识,主要包括:机构的运动、动力分析;机构、零件的选型和设计;图样的绘制;机械的加工制造过程以及工程材料等方面的基础知识。

2) 具有创新意识和创新能力。创新是人类社会不断进步的源动力。机械产品的创新完全依赖于设计者的创新意识和创新能力。创新能力是一个设计者所必备的最重要的素质。

3) 具有认真细致、一丝不苟的工作作风。设计是很细致的工作,来不得半点马虎大意。哪怕是一个很小的设计错误,也可能在制造中造成巨大的浪费,在使用中导致严重的

事故。

4) 具有团结协作精神。对于需要由很多人共同完成的大型设计任务,每个设计者的独立工作能力固然重要,但是否具有良好的团结协作精神,对顺利完成整个设计任务也是非常重要的。

第二节 机械设计课程简介

一、本课程的性质、任务和内容

机械设计课程是研究机械装置和机械系统的设计问题,培养学生具有机械设计能力的一门技术基础课。通过本课程的学习,使学生在机械设计的基础知识、基本理论以及基本设计方法等各方面得到基本的训练和提高,为进一步学习专业课程打下坚实的基础。

本课程的主要任务是通过课堂理论学习、课程设计以及实验等教学环节,培养学生:

1) 掌握通用机械零件的设计原理、方法和机械设计的一般规律,具有设计机械传动装置和简单机械的能力。

2) 树立正确的设计思想和创新意识,具有一定的机械设计创新能力。

3) 具有运用标准、规范、手册、图册和查阅相关技术资料的能力。

4) 掌握典型机械零件的实验方法,获得实验技能的基本训练。

5) 关注国家当前的有关技术政策,并对机械设计的新发展有所了解。

本课程的主要内容是,机械设计常用的一些基础理论和通用机械零件在常用参数范围内的基本设计方法。具体内容有以下五部分:

1) 基础理论部分。基础理论部分包括机械设计总论、机械零件的疲劳强度计算和摩擦学的基础知识等。

2) 联接部分。联接部分包括螺纹联接、键联接、销联接、形面联接、过盈联接以及铆、焊、粘接等。

3) 传动部分。传动部分包括螺旋传动、带传动、齿轮传动、蜗杆传动以及链传动。

4) 轴系部分。轴系部分包括轴、滑动轴承、滚动轴承、联轴器和离合器等。

5) 其他部分。其他部分包括弹簧等。

近几十年来,为使产品设计更科学、更完善、更符合时代的要求,逐渐发展形成了诸如优化设计、可靠性设计、计算机辅助设计(CAD)、模块化设计等新的设计方法。可以说,相对于这些新的设计方法,本课程介绍的是通用零件的传统的基本设计方法。本课程的内容是从事机械设计工作的基础,也是以后进一步学习各种新设计方法的基础。

二、本课程的特点和学习方法

和理论力学、材料力学、机械原理等先修课程相比,本课程具有以下几个特点:

1) 与实际结合更紧密。课程内容更接近于工程实际,研究中考虑机械零件的实际形状和尺寸,考虑零件的实际工作条件。因此,在学习过程中,应注意联系工程实际,有机会多观察、多实践,逐步积累实践经验。

2) 关系密切的先修课多。本课程与机械制图、理论力学、材料力学、金属工艺学、金属材料及热处理、公差技术与测量、机械原理等先修课程有着密切的联系。学习中要经常复习、回顾、深化这些课程的有关内容。

3) 典型通用零件的门类多。不同类型的通用零件,在工作原理、结构、设计方法等各方面都不尽相同。学习时,要注意对各种零件的工作原理、特点、适用场合以及设计方法等进行分析比较,找出各种零件在上述各方面的共性和特性,要善于总结某些普遍规律。

4) 设计一个机械零件需要满足的要求多。对于所设计的机械零件,往往需要同时满足强度、刚度、工艺性、经济性、体积、重量等各方面的要求。学习中,必须善于对各方面的要求进行全面的分析比较,抓住重点,权衡轻重,区别对待,具体问题具体分析。

5) 各种类型的公式多。课程内容中包含了大量的公式,对于大多数公式,不强调公式的推导和记忆,而着重于了解公式的来源和相应力学模型的简化,并能够正确地使用。但对于定义性的公式(如许用应力 $[\sigma] = \sigma_{\text{lim}}/S$ 等),则要求在理解的基础上记住。

6) 图形多、表格多。本课程的很多内容是以图形和表格的形式出现的,对各种图、表都首先要能够看懂。对于设计时用于选取参数(或系数)的图表,除了要会用以外,还要了解其适用的范围和相关参数(或系数)的变化规律。

在本课程的学习中,除了掌握各种零件的相关理论分析和计算方法以外,更要重视零件的材料选择、类型选择、参数选择以及结构设计等内容。材料、类型、参数的选择及结构设计是否合理,直接决定着一个机械零件设计的成败。

最后,在本课程的学习中还应注意两点:一是大部分零件的设计问题往往会有多种解答。因此,要学会从多种可能的解答中通过评价找出最佳答案;二是设计决不仅仅是计算,计算只是为进行结构设计时确定零件的尺寸参数提供一个依据。计算以及结构设计的结果,最终以零件工作图的形式表达出来。

第三节 机械零件的计算准则

机械零件由于某种原因不能正常工作称为失效。对此概念应注意以下两点:①失效并不仅指破坏,破坏只是失效的形式之一。实际机械零件可能的失效形式有很多,但归结起来,最为常见的是由于强度、刚度、耐磨性、温度及振动稳定性等方面的原因所引起的失效。②同一个机械零件可能产生的失效形式往往有数种,例如高速旋转的轴可能会产生断裂、过大的塑性变形以及共振等几种不同的失效形式。

机械零件在一定条件下抵抗失效的能力称为工作能力。用载荷表示的工作能力称为承载能力。为防止发生某种失效而应满足的条件称为机械零件的计算准则。计算准则是设计机械零件的理论依据。不同失效形式所对应的计算准则亦不相同。

通常,在保证所设计的零件不发生失效的前提下,希望其尺寸尽量小,重量尽量轻。为此,设计时需要以计算准则为依据进行必要的计算。计算方法(过程)有两种:根据零件可能的失效形式所对应的计算准则,通过计算确定满足该准则的零件尺寸,这样的计算称为设计计算;参照已有实物、图样或根据经验先确定零件尺寸,然后再核算零件尺寸是否满足计算准则,这样的计算称为校核计算。校核计算时,如不满足计算准则,则应修改零件尺寸,重新计算,直到满足计算准则为止。虽然两种计算的过程不同,但目的都是为了防止所设计的零件在工作中发生失效。

与前述强度、刚度、耐磨性以及振动稳定性等方面的失效形式相对应,常用的计算准则主要有强度准则、刚度准则、摩擦学准则以及振动稳定性准则等。

一、强度准则

强度是指机械零件抵抗破坏（断裂或塑性变形）的能力。强度准则是防止零件发生破坏失效而应满足的条件，也称为强度条件。

工作中机械零件所受的正应力（拉压、弯曲）和切应力（剪切、扭切），通常都产生在零件材料的较大体积内，往往会导致零件的整体破坏，这种状态下的强度可称为整体强度；而对于工作中接触受压的两个零件，在接触面上产生的表面应力作用下，破坏通常发生在零件的接触面表层，这种状态下的强度可称为表面强度。表面强度分为表面接触强度（两零件之间理论上为点、线接触）和挤压强度（两零件之间理论上为面接触）。

在理想平稳工作条件下零件所受的载荷称为名义载荷。但实际中，由于冲击以及运动产生的惯性力等因素的影响，使机器及其零件受到各种附加载荷。另外，载荷在零件上的分布也往往是不均匀的。因此，机器在工作中实际受到的载荷通常会大于名义载荷。用载荷系数 K （只考虑工作情况的影响时，则为工作情况系数 K_A ，简称工况系数）计入上述因素对载荷的影响。载荷系数与名义载荷的乘积称为计算载荷，它代表的是机器或零件实际所受的载荷。

按照是否随时间变化，载荷分为两类：不随时间变化或变化缓慢的载荷称为静载荷，如零件的自重、静水的压力等；随时间变化的载荷称为变载荷，如内燃机中活塞、弹簧以及汽车中齿轮等所受的载荷。

按照是否随时间变化，应力也分为两类：不随时间变化或变化缓慢的应力称为静应力；随时间变化的应力称为变应力。静应力只能在静载荷作用下产生；变应力由变载荷产生，也可由静载荷产生。例如，在不变的径向力作用下，旋转轴中产生的弯曲应力即为变应力。

（一）整体强度

1. 强度条件

强度条件可用应力表示，也可用安全系数表示。

1) 用应力表示的强度条件为

$$\sigma \leq [\sigma], \quad \tau \leq [\tau] \quad (1-1)$$

式中 σ 、 τ ——零件危险截面上的最大正应力和最大切应力，设计中按计算载荷求得；

$[\sigma]$ 、 $[\tau]$ ——许用正应力和许用切应力，其定义式为

$$[\sigma] = \frac{\sigma_{\lim}}{[S_{\sigma}]}, \quad [\tau] = \frac{\tau_{\lim}}{[S_{\tau}]} \quad (1-2)$$

式中 $\sigma_{\lim}$ 、 $\tau_{\lim}$ ——极限正应力和极限切应力；

$[S_{\sigma}]$ 、 $[S_{\tau}]$ ——分别为正应力和切应力的许用安全系数。通常，对塑性材料零件， $[S_{\sigma}]$ 、 $[S_{\tau}]$ 取为 1.5~2；对组织不均匀的脆性材料和组织均匀的低塑性材料， $[S_{\sigma}]$ 、 $[S_{\tau}]$ 取为 3~4。

2) 用安全系数表示的强度条件为

$$S_{\sigma} \geq [S_{\sigma}], \quad S_{\tau} \geq [S_{\tau}] \quad (1-3)$$

式中 S_{σ} 、 S_{τ} ——正应力和切应力的实际安全系数，由下式计算

$$S_{\sigma} = \frac{\sigma_{\lim}}{\sigma}, \quad S_{\tau} = \frac{\tau_{\lim}}{\tau} \quad (1-4)$$

应当指出，式（1-1）和式（1-3）所表示的强度条件实质是相同的，只是表达形式不同

而已。

2. 极限应力的确定

计算许用应力时, 需根据零件材料的种类和应力的性质合理确定极限应力。

(1) 静应力下的极限应力 零件受静应力时, 需计算其静强度。如静强度不足, 塑性材料零件的可能失效形式是产生塑性变形; 脆性材料零件的可能失效形式是断裂。据此, 可确定静应力下的极限应力。

1) 塑性材料零件, 以材料的屈服点作为极限应力, 即

$$\sigma_{\text{lim}} = \sigma_s, \quad \tau_{\text{lim}} = \tau_s \quad (1-5)$$

2) 脆性材料零件, 以材料的强度极限作为极限应力, 即

$$\sigma_{\text{lim}} = \sigma_b, \quad \tau_{\text{lim}} = \tau_b \quad (1-6)$$

只受正应力或只受切应力时, 按式 (1-1) 或式 (1-3) 进行强度计算即可。

同时受正应力和切应力时, 按材料力学中的强度理论计算危险截面上的当量应力 σ_e 。通常, 塑性材料零件按第三或第四强度理论计算; 脆性材料零件按第一强度理论计算。此时的强度条件为: $\sigma_e \leq [\sigma]$ 。

另外, 对于塑性材料零件, 某处的局部应力达到屈服点后, 材料开始屈服流动, 局部的最大应力将不再增大, 也就不会导致零件整体破坏; 对于组织不均匀的脆性材料 (如灰铸铁), 材料内部本来就存在的缺陷引起的应力集中, 往往比零件形状和机械加工所引起的应力集中还大, 所以, 后者对材料的静强度无显著影响。因此, 在计算静强度时, 对塑性材料和组织不均匀的脆性材料, 可不考虑应力集中的影响。但是, 对组织均匀的低塑性材料 (如低温回火的高强度钢), 则应考虑集中应力。

(2) 变应力下的极限应力 零件受变应力时, 可能的失效形式是疲劳破坏, 设计中需计算其疲劳强度。不论是静强度还是疲劳强度, 强度条件的表达形式是相同的, 只是极限应力有所不同。变应力作用下, 应以疲劳极限作为极限应力。疲劳极限以及疲劳强度计算方法详见第二章。

(二) 表面接触强度

对于理论上为点、线接触的高副零件, 在载荷作用下材料发生弹性变形后, 变为面接触, 此时零件在接触部位产生的应力称为表面接触应力 (简称接触应力)。在接触应力作用下的强度称为表面接触强度。最大接触应力 σ_H 发生在接触面的中心 (或中线) 上, 见图 1-3。

通常情况下, 工作中高副零件的接触部位是周期性变化的, 这导致零件的接触应力也周期性变化, 如齿轮轮齿的接触、滚动轴承中滚动体与两套圈的接触等。在接触变应力的反复作用下, 首先在零件表层产生微裂纹, 之后, 裂纹沿着与表面呈锐角的方向扩展, 到达一定深度后又越出零件表面, 最后有小片的材料剥落下来, 在零件表面形成小坑 (图 1-3), 这种现象称为疲劳点蚀 (简称点蚀)。点蚀是接触变应力下的失效形式。

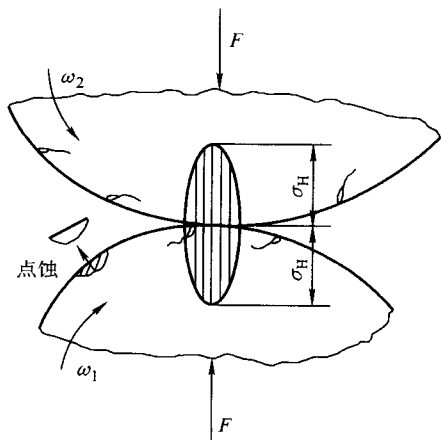


图 1-3 接触应力与疲劳点蚀

防止点蚀应满足的强度条件为

$$\sigma_H \leq [\sigma_H] \quad (1-7)$$

式中 σ_H ——零件的最大接触应力 (MPa);

$[\sigma_H]$ ——许用接触应力 (MPa)。

本课程中需计算的接触强度主要为线接触的情况,下面只给出线接触时 σ_H 的计算公式。

根据弹性力学理论,将理论上为线接触(接触处的曲率半径分别为 ρ_1 、 ρ_2) 的两个零件简化为两个圆柱体接触的模型(图 1-4),按式(1-8)(称为赫兹公式)计算其最大接触应力。即

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{F}{\pi L} \left[\frac{\frac{1}{\rho}}{\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2}} \right]} \quad (1-8)$$

式中 E_1 、 E_2 ——两接触体材料的弹性模量 (MPa);

μ_1 、 μ_2 ——两接触体材料的泊松比;

F ——两接触体所受的载荷 (N);

ρ ——综合曲率半径 (mm), $\frac{1}{\rho} = \frac{1}{\rho_1} \pm \frac{1}{\rho_2}$, 正号用于外接触;负号用于内接触;

L ——接触宽度 (mm)。

(三) 挤压强度

理论上为面接触的两个零件,承载时在接触面上受到的压应力称为挤压应力,用 σ_p 表示。挤压应力作用下的强度称为挤压强度。挤压强度不足时的失效形式为压溃(表面断裂或表面塑性变形)。

防止压溃应满足的强度条件为

$$\sigma_p \leq [\sigma_p] \quad (1-9)$$

式中 σ_p ——零件的挤压应力 (MPa);

$[\sigma_p]$ ——许用挤压应力 (MPa)。

当接触面为曲面时,挤压应力在接触面上的分布往往比较复杂。通常,按接触面在载荷方向的投影面积计算挤压应力 σ_p 。

二、刚度准则

刚度是指机械零件在载荷作用下抵抗弹性变形的能力。如果机器中的某些零件刚度不足,工作时将会产生过大的弹性变形,从而影响机器的正常工作。例如机床主轴刚度不足将会影响被加工工件的精度;内燃机配气系统中的凸轮轴刚度不足,将会导致阀门不能正常启

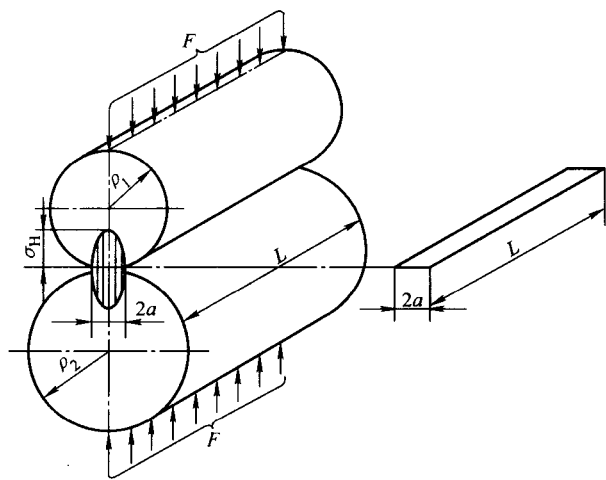


图 1-4 两圆柱体接触

闭。因此，对于某些零件，在设计时需要进行刚度计算。应满足的刚度条件为

$$x \leq [x] \quad (1-10)$$

式中 x ——实际变形量，可通过计算或实际测量确定其大小，但在设计阶段只能由计算确定。根据受力形式的不同， x 可以是拉压变形 ΔL 、挠度 y 、转角 θ 、扭角 φ 等，见图 1-5；

$[x]$ ——许用变形量，是机器正常工作所允许的最大变形量。

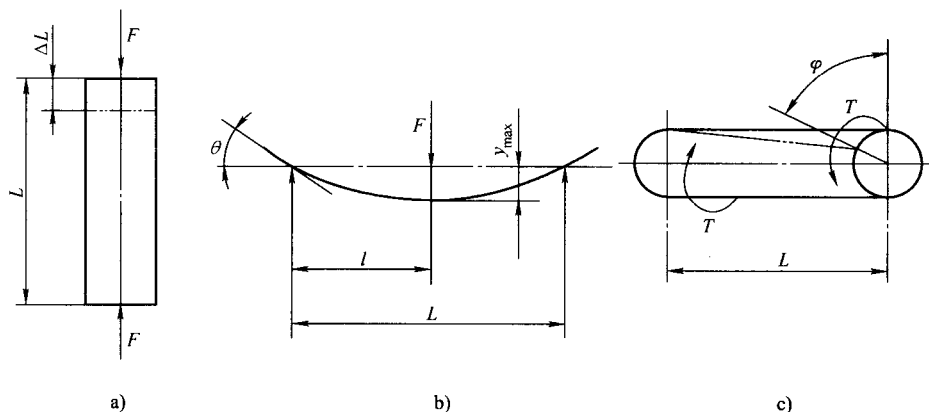


图 1-5 变形形式

a) 拉压变形 b) 弯曲变形 c) 扭转变形

通常，刚度计算得到的零件尺寸比强度计算得到的尺寸大，所以，满足刚度条件的零件往往也满足强度条件。但对于尺寸较大的零件，满足刚度条件，却不一定满足强度条件。

弹性模量 E 是表示材料刚度大小的性能指标， E 越大则刚度越大。应当注意：合金钢的 E 值与碳钢相差不大，因此，在尺寸相同的条件下，用合金钢代替碳钢（可以提高强度）不能提高零件的刚度。

提高零件刚度的主要措施有：减小力臂和支点距离、增加辅助支承、选择合理的截面形状、加大截面积以及采用加强肋等。

三、摩擦学准则

摩擦学准则也称耐磨性准则。在滑动摩擦下工作的零件，常因过度磨损而失效。由于影响磨损的因素很多且比较复杂，因此，到目前为止尚无完善的磨损计算方法。通常采用条件性计算，通过限制影响磨损的主要因素（压强 p 、滑动速度 v 和 pv 值）来防止产生过大的磨损。

滑动速度低，载荷大时，只需限制压强 p 不超过许用压强 $[p]$ ，即

$$p \leq [p] \quad (1-11)$$

滑动速度较高时，往往由于摩擦生热，温度过高（使润滑油膜破坏），导致润滑失效。因此，除了限制压强以外，还需限制压强与滑动速度的乘积 pv （此乘积越大，在单位时间内，单位接触面上的摩擦功耗越大，温升越大）不超过许用值 $[pv]$ ，即

$$pv \leq [pv] \quad (1-12)$$

高速时，往往由于滑动速度高而引起过快过大的磨损。所以，还需要限制滑动速度 v 不